

## 基于压电的大尺寸原理样机模型和实验\*

邓志强<sup>1,2</sup>, 王翔<sup>1,2</sup>, 伞海生<sup>1,2</sup>

(1. 厦门大学 物理与机电工程学院 机电系 福建 厦门 361005;

2. 厦门大学 萨本栋微米纳米科学技术研究院 福建 厦门 361005)

**摘要:** 为了实现环境振动能量的低频收集,分析了压电式振动能量收集技术的特点,并建立了其数学模型。利用数值分析软件对能量收集器的性能进行了仿真模拟,压电式能量收集器更适用于低频环境下的能量收集。成功制造了具有四根环形悬臂梁结构的大尺寸原理样机,实验得到了在外界 0 ~ 500 Hz 低频扫频下,不同加速度激励下的开路电压、负载电阻的电压输出,并与理论分析结果对比。

**关键词:** 压电; 原理样机; 低频; 环形悬臂梁

**中图分类号:** TH 703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-9787(2015)08-0013-03

## Modeling and experiment of large-scale principle prototype based on piezoelectric\*

DENG Zhi-qiang<sup>1,2</sup>, WANG Xiang<sup>1,2</sup>, SHAN Hai-sheng<sup>1,2</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, School of Physical and Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** In order to harvest low-frequency vibration energy of environment, analyze characteristics of piezoelectric vibration energy harvesting technology, and set up math model. Simulation on property of energy harvester is carried out by numerical analysis software, prototype with four annular cantilevers is made. Theoretical and experimental models are presented. Based on state space equations, numerical analysis are performed. Open-circuit voltage and voltage output load resistance at different accelerations of low-frequency 0 ~ 500 Hz vibration sources are obtained by experiment and the experimental result is compared to theoretical result.

**Key words:** piezoelectric; prototype; low-frequency; annular cantilevers

### 0 引言

无线传感器网络技术的发展要求更持久的供能,将环境中的振动能源收集转换为电能,其寿命长,无须更换,实现电子器件的自供能,是较为有前景的一种替代传统电池的技术。目前有以下四种形式实现振动能量的转换:压电式、电磁式、磁致伸缩式和静电式,其中,压电式能量收集装置具有结构简单、压电材料容易获得、易与微型器件兼容等特点。目前,研究人员通过基于压电的大尺寸原理样机对能量收集器进行分析和实验,其中,PZT-5A 尺寸的厚度在 1 mm 以内,悬臂梁尺寸在 20 mm × 20 mm × 20 mm 以内,材料为钢或者铜等,共振频率范围在 100 ~ 1 000 Hz 之间,并实现了振动能量的转换<sup>[1]</sup>。但大多能量收集器都是基于

线性的机电转换模型和单悬臂梁结构<sup>[2,3]</sup>。然而,在环境中大部分是低频振动源<sup>[4]</sup>,大致频率范围为 0 ~ 500 Hz。因此,设计出适应环境的低频振动能量收集器至关重要。

本文通过有限元软件辅助设计出具有四根环形悬臂梁的低频振动能量收集器结构,并建立了压电振动能量收集器的数学模型,并在此基础上,通过数值分析软件进行了仿真模拟。制造的大尺寸原理样机可以实现外界环境低频振动能量收集。

### 1 压电能量收集器的数学模型

为了研究能量输出特性,基于振动能量收集的压电元件可视为一正弦交流电流源<sup>[5]</sup>,其压电储存电容为  $C_{\text{PZT}}$ ,负载输出电阻为  $R_L$ ,如图 1 所示。

收稿日期: 2015-06-04

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075344, 61274120)

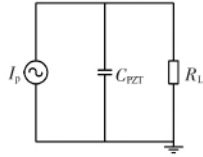


图1 压电能量收集器的电路模型

Fig 1 Equivalent circuit model of piezoelectric energy harvester

单根悬臂梁结构和 PZT 受压示意图如图 2 所示,  $a$  为固定端,  $b$  为自由端, 悬臂梁弯曲导致 PZT 发生形变。

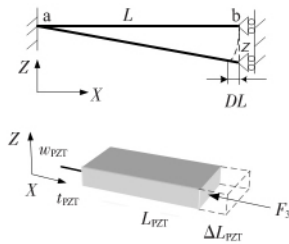


图2 单根悬臂梁和 PZT 受压示意图

Fig 2 Diagram of single cantilever structure and

#### PZT deformation

根据压电方程  $D_1 = d_{31}\sigma_3$ , 可得

$$\frac{Q}{w_{PZT}L_{PZT}} = d_{31} \frac{F_3}{w_{PZT}t_{PZT}} \quad (1)$$

通过推导和计算, 可得器件的机电耦合系数  $n$  为

$$n = \frac{d_{31} Y_{PZT} w_{PZT}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L}{z(t)}\right)^2}} \frac{L_{PZT}}{L} \quad (2)$$

其中  $D_1$  为电位移,  $d_{31}$  为压电转换系数,  $\sigma_3$  为应力,  $Q$  为电量,  $w_{PZT}$  为 PZT 的宽度,  $L_{PZT}$  为 PZT 的长度,  $d_{31}$  为压电系数,  $F_3$  为所受力,  $t_{PZT}$  为 PZT 的厚度,  $Y_{PZT}$  为 PZT 的杨氏模量,  $L$  为悬臂梁的长度,  $z(t)$  为输出位移。

本文采用四根环形悬臂梁结构, 压电薄膜(图中黑色部分)覆盖每根悬臂梁, 如图 3 所示。

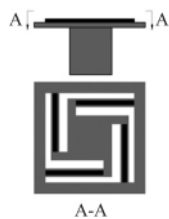


图3 悬臂梁结构示意图

Fig 3 Diagram of cantilever structure

通过引线, 并联后的四根压电材料的输出电流  $i_{PZT}(t)$  为

$$i_{PZT}(t) = \frac{4L_{PZT}}{L} \frac{d_{31} Y_{PZT} w_{PZT}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L}{z(t)}\right)^2}} \dot{z}(t) \quad (3)$$

负载电压  $u(t)$  为

$$u(t) = i_R(t) R_L = \frac{4L_{PZT}}{L} \frac{d_{31} Y_{PZT} w_{PZT}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L}{z(t)}\right)^2}} \frac{R_L}{1 + R_L \omega_n C} \dot{z}(t) \quad (4)$$

其中  $\omega_n$  为系统共振频率,  $C$  为压电内部电容。

压电阻尼  $b_{PZT}$  为<sup>[6]</sup>

$$b_{PZT} = n^2 \frac{R_L}{1 + R_L \omega_n C} = 16 \frac{(L_{PZT} d_{31} Y_{PZT} w_{PZT})^2}{L^2 \left(1 + \left(\frac{L}{z(t)}\right)^2\right)} \frac{R_L}{1 + R_L \omega_n C} \quad (5)$$

基于线性弹性理论<sup>[7]</sup>, 可以得到压电收集器的状态空间方程如下

$$m\ddot{a}(t) = m\ddot{z}(t) + b_m \dot{z}(t) + b_{PZT} \dot{z}(t) + kz(t) \quad (6)$$

其中  $a(t)$  为外界激励加速度,  $k$  为弹性系数,  $b_m$  为机械阻尼。

## 2 压电能量收集器分析模型

由于系统的状态方程是多阶的, 而且收集器的电学输出与动态方程密切相关, 因此, 使用数值分析软件对模型进行动态仿真模拟。通过 ANSYS 结构建模得到处于低频状态下的一阶振动频率和振动模态。通过 ANSYS 优化分析, 大尺寸原理样机共振振幅和一阶共振频率值分别为  $40.8 \mu\text{m}$ ,  $120 \text{ Hz}$ 。

为了分析和求解压电能量收集器的动态特性和电学输出, 选择使用数值软件 MATLAB/SIMULINK 来进行求解。

## 3 原理样机的制造和测试实验

### 3.1 原理样机参数设计

压电陶瓷材料为 PZT-5A, 原理样机相关参数如表 1 所示。

表1 大尺寸原理样机参数

Tab 1 Parameters of large size principle prototype

参数名称	数值	参数名称	数值
PZT 宽度 $w_{PZT}$ (mm)	3	悬梁厚度 $t$ (mm)	0.2
PZT 长度 $L_{PZT}$ (mm)	24	极板面积 $A$ (mm)	144
PZT 厚度 $t_{PZT}$ (mm)	0.4	质量块 $m$ (g)	1.8
悬梁长度 $L$ (mm)	18	介电常数 $\epsilon_0$ (pF/m)	8.854
悬梁宽度 $w$ (mm)	2.5	压电系数 $d_{31}$ (pC/N)	171

### 3.2 制备原理样机

选择好 PZT 压电材料, 并设计好了结构参数, 通过 SOLIDWORKS 三维机械建模得到了能量收集器的 3D 模型和组装图, 基于 3D 模型和装配图, 通过机械加工方法(例如: 线切割等)制造了大尺寸样机如图 4 所示, 整个装置通过螺丝连接好。

### 3.3 原理样机测试平台

所采用的测试平台结构如图 5 所示。激振器的频率和

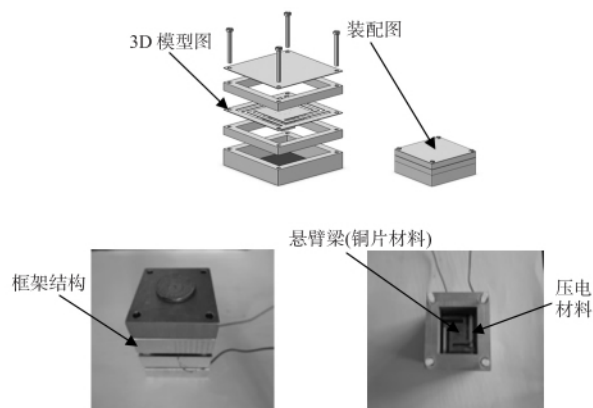


图 4 大尺寸原理样机 3D 模型和装配图以及实物图

Fig 4 3D model for large size principle prototype and assembly drawing and physical map

幅度由信号发生器和功率放大器控制。振动加速度通过安装在振动器的加速度计测得,加速度信号由数据采集卡发送到 PC 上显示。示波器用来测试能量收集器的输出电压。通过扫频输入,可以得到输出信号。

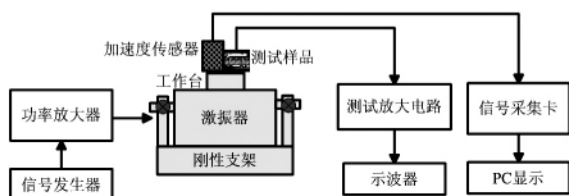


图 5 测试振动平台

Fig 5 Test vibration platform

### 3.4 测试结果与讨论

通过线切割等各种机械加工方法,制备大尺寸原理样机,并搭建好了测试平台。图 6 所示是在不同的加速度激励下,大尺寸原理样机开路电压随频率的变化。在加速度为  $0.01g_n$  激励下和外加  $100\text{ k}\Omega$  的负载电阻器,大尺寸原理样机输出电压如图 7 所示。

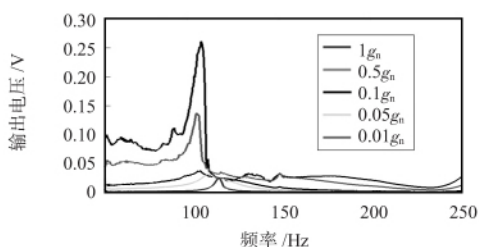


图 6 大尺寸原理样机开路电压随频率的变化

Fig 6 Output voltages of large size principle prototype in open circuit vs frequency

由图 7 可知,大尺寸原理样机电压输出与理论分析结果很接近。在  $120\text{ Hz}$  共振频率和  $1g_n$  加速度激励下,最大输出电压可达到  $0.27\text{ V}$ 。这也验证了在共振频率下,能量输出达到最大,而且随着外界激励加速度的增加,输出电压也随之增大。然而,在高级加速度激励下,测试结果显示共

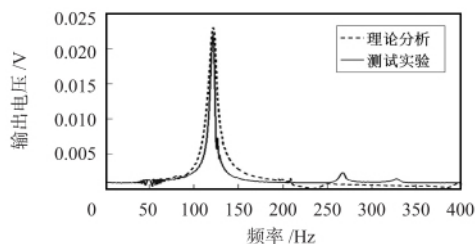


图 7 大尺寸原理样机的负载电阻输出电压随频率的变化

Fig 7 Output voltage of load resistance of large size

### principle prototype vs frequency

振频率出现偏移,共振频率值变得更小。其主要原因是高级加速度激励下质量块惯性位移提高,振幅增加,振动减速,导致共振频率减小。关于质量块对共振频率的调节方法和实现宽频带的能量输出需要进一步的理论和实验分析。

### 4 结束语

本文建立压电式能量收集器的数学模型,并利用数值分析软件对能量收集器的性能进行了仿真预测。同时,成功制造了具有 4 个环形悬臂梁结构的大尺寸原理样机。总结了原理样机在低频环境下的性能,其实验结果和理论分析很吻合。本文所提出的设计思路与仿真模型,对应用于低频振动环境下能量收集器的设计有一定的参考价值,并且为制造出 MEMS 压电能量收集器的样品做准备工作。

### 参考文献:

- [1] Roundy S, Wright P K, Rabaey J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes [J]. Computer Communications 2003, 26: 1131 - 1144.
- [2] Mlitcheson P D, Green T C, Yeatman M, et al. Architectures for vibration-driven micropower generators [J]. Journal of Micro-electro-mechanical Systems 2004, 13(3): 429 - 440.
- [3] Khameneifar F, Arzanpou S, Moallem M. A piezoelectric energy harvester for rotary motion applications: Design and experiments [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 2013, 18(5): 1527 - 1534.
- [4] 李如春, 征琦, 林宇俊. 基于低频驱动的微压电能量收集器的结构研究 [J]. 压电与声光 2014, 36(5): 735 - 738.
- [5] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器与换能器阵 [M]. 北京: 北京大学出版社 2005.
- [6] Richards C D, Anderson M J, Bahr D F, et al. Efficiency of energy conversion for devices containing a piezoelectric component [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering 2004, 14(5): 717.
- [7] Williams C B, Yates R B. Analysis of a micro-electric generator for microsystems [C] // Proceedings of the Transducers '95 / Eurosensors IX, 1995: 369 - 372.

### 作者简介:

邓志强 (1988 -), 男, 江西丰城人, 博士研究生, 研究方向为微能源收集技术。